基于ESI研究前沿的纳米领域研究分析*



边文越　王海名　邢 颖　李国鹏　张超星　冷伏海**

中国科学院科技战略咨询研究院 北京 100190

摘要　ESI数据库基于高被引论文（Top 1%）间的共被引关系聚类形成一个个研究前沿。文章以ESI数据库中的11 814个研究前沿为基础，通过文献检索、专家遴选等方法筛选出纳米领域的研究前沿1 391个，再通过人工聚类形成若干研究方向和研究领域。并选取了太阳能电池、纳米仿生孔、纳米催化、测量表征4个研究领域进行了重点分析解读，比较了各国高被引论文数量，解读了中国具有优势的研究方向和研究团队。

关键词　研究前沿，纳米科技，太阳能电池，纳米催化，纳米仿生孔

DOI　10.16418/j.issn.1000-3045.2017.10.014

自2014年起，中科院战略情报研究团队与科睿唯安公司（Clarivate Analytics，原汤森路透知识产权与科技事业部）合作，通过文献计量和专家研判，从ESI（Essential Science Indicators）数据库中遴选出十大学科领域的年度热点前沿和新兴前沿，并进行分析和解读，连续3年发布《研究前沿》年度研究报告，在科学界和社会上引起了积极的反响[1]。笔者主持并参与了历年《研究前沿》报告的研制，在为取得的成绩高兴之余，也清醒地意识到报告还存在若干不足之处，主要有两点：（1）受人力限制，报告只能选取各学科领域最热门的10多个研究前沿进行分析解读，未能对学科领域的整体情况进行全面分析解读；（2）通过文献计量学共被引聚类形成的研究前沿通常比较具体，侧重于研究点（如“基于非富勒烯受体的聚合物太阳能电池”），对于更宏观的研究方向（如“聚合物太阳能电池”）的揭示还有待改进。

因此，本文选择纳米领域为突破口，通过文献检索和专家遴选等方法，从ESI数据库中遴选出属于纳米研究领域的全部研究前沿1 391个。首先，通过对发表在这些纳米前沿领域的高被引论文进行统计分析，对各国竞争态势进行宏观概括。然后，根据研究主题的相似性，将这些研究前沿人工聚类形成若干个研究方向，研究方向再人工聚类成

*资助项目：纳米科技重大创新领域发展态势研究（Y701231901）

**通讯作者

修改稿收到日期：2017年10月2日

若干个研究领域，从而形成领域-方向-前沿的三级分析结构（一些领域为领域—子领域—方向—前沿四级结构）。通过这种分析结构，将一个研究领域涉及的所有研究前沿全部网罗进来，实现对领域的全面、细致、深入分析。受篇幅限制，本文选取了 4 个领域进行分析解读。

1 纳米研究前沿遴选

ESI 数据库基于高被引论文（Top 1%）之间的共被引关系，聚类形成若干高被引论文簇。每一簇包括研究主题相同或相近的若干篇高被引论文，形成一个“研究前沿”（Research Fronts）[2]。《研究前沿》报告就是以 ESI数据库中的研究前沿为分析基础。本文以 ESI 数据库中的 11 814 个研究前沿为基础，利用 Arora 等人[3]构建的纳米科技领域检索式，首先筛选出其中可能属于纳米领域的研究前沿 1 512 个；然后经过领域专家遴选、判定，最终筛选出纳米领域研究 1 391 个，涉及高被引论文 6 639 篇[4]。ESI 数据获取时间为 2016 年 1月，高被引论文发表时间为 2008—2015 年。

对纳米研究涉及的 6 639 篇高被引论文的通讯作者国别情况进行统计，结果如表 1 所示。在纳米研究领域的高被引论文数量方面，美国和中国分居前两位，遥遥领先于其他国家，反映出美国和中国该领域研究整体上具有优势。

表 1　高被引论文通讯作者 Top 10 国家（2008—2015 年）

排名	通讯作者国家	高被引论文（篇）
1	美国	2 243
2	中国	1 645
3	德国	330
4	日本	238
5	新加坡	234
6	韩国	220
7	英国	219
8	法国	143
9	伊朗	126
9	加拿大	126

2 纳米研究前沿分析解读

本文根据研究主题的相似性，把1 391个纳米领域研究前沿人工聚类形成若干个研究方向，研究方向再人工聚类形成若干个研究领域，形成领域—方向—前沿三级分析结构（一些领域为领域—子领域—方向—前沿四级结构），从对具体研究前沿的分析上升到对研究方向、研究领域的分析。受篇幅限制，本文选取了太阳能电池、纳米仿生孔、纳米催化和测量表征4个领域进行分析解读，表2列出这4个各领域所涉及的研究前沿数量和高被引论文数量。

表 2　太阳能电池、纳米仿生孔、纳米催化和测量表征 4 个领域聚类情况（2008—2015 年）

研究领域	研究前沿（个）	高被引论文（篇）
太阳能电池	102	516
纳米仿生孔	5	45
纳米催化	92	303
测量表征	39	153

2.1　太阳能电池

太阳能电池领域主要包括钙钛矿型太阳能电池、聚合物太阳能电池、量子点敏化太阳能电池等研究方向，涉及研究前沿 102 个、高被引论文 516 篇。如表 3 所示，美国在该领域的高被引论文数量最多，中国位列第二，与美国的差距较小。其他国家在高被引论文数量方面与美、中两国差距较大。

表 3　太阳能电池领域研究前沿高被引论文 Top 10 国家（2008—2015 年）

排名	通讯作者国家	高被引论文（篇）	所占比例（%）
1	美国	158	30.6
2	中国	119	23.1
3	韩国	31	6.0
4	英国	30	5.8
5	德国	18	3.5
6	瑞士	16	3.1
6	澳大利亚	16	3.1
8	加拿大	14	2.7
9	西班牙	13	2.5
10	日本	12	2.3

2.1.1 钙钛矿型太阳能电池

钙钛矿型太阳能电池是第三代太阳能电池中最热门的研究方向，短短几年时间就超过了非晶硅、染料敏化、有机太阳能电池等新一代薄膜电池历经10多年的成果，被《科学》杂志评为2013年度十大科学突破之一。钙钛矿型太阳能电池的核心是具有钙钛矿ABX_3晶型的有机金属卤化物吸光材料。ABX_3晶型中最常见的是碘化铅甲胺（$CH_3NH_3PbI_3$）。2009年，日本桐荫横滨大学Miyasaka课题组率先以钙钛矿型材料作吸光层，在染料敏化太阳能电池基础上制造出钙钛矿型太阳能电池，但光电转换效率仅为3.8%[5]。2011年，韩国成均馆大学Nam-Gyu课题组将效率提高到6.5%[6]。2012年，牛津大学Snaith课题组提出了“介孔超结构太阳能电池”的概念，光电转换效率首次突破10%[7]。2013年，瑞士洛桑联邦理工学院Grätzel课题组将效率提高到15%[8]。2014年底，韩国化学技术研究所Seok课题组将转换效率提高至20.1%[9]。2015年，中、日、瑞士合作制得大面积（工作面积超过1 cm^2）钙钛矿型太阳能电池，使其首次可以与其他类型太阳能电池在同一标准下比较性能，15%的能量转化效率得到国际权威机构认证[10]。2016年，Grätzel课题组进一步将认证效率提高至19.6%[11]。与英国、瑞士、韩国等国相比，中国在该研究方向的高被引论文相对较少。

2.1.2 聚合物太阳能电池

在本体异质结聚合物太阳能电池研究中，富勒烯基材料一直是受体材料的主流，但也存在一些突出问题。针对于此，研究人员开展了非富勒烯受体材料的研究，主要有两类：有机小分子和聚合物。在有机小分子受体材料方面，北京大学占肖卫团队率先提出了稠环电子受体的概念，设计合成了一系列高性能有机稠环电子受体材料，2016年电池效率提升至9.6%[12]。同年，中科院化学所侯建辉团队采用有机小分子受体，在小面积非富勒烯型聚合物太阳能电池器件中取得了创纪录的11.2%的能量转换效率，使非富勒烯型聚合物太阳能电池效率达到了富勒烯受体的水平[13]。在聚合物受体材料方面，即全聚合物太阳能电池，中科院化学所李永舫团队表现活跃。2016年，该团队将全聚合物太阳能电池的能量转换效率提高到8.27%[14]。

除上述外，2016年，南开大学陈永胜团队利用寡聚物材料的互补吸光策略构建了一种具有宽光谱吸收特性的叠层有机太阳能电池器件，实现了12.7%的光电转化效率，创造了当时文献报道的有机/高分子太阳能电池光电转化效率的最高纪录[15]。

2.1.3 量子点敏化太阳能电池

量子点敏化太阳能电池因其制备成本低、工艺简单及量子点本身的优异性能（如尺寸效应、多激子效应）等优点，近年来受到广泛关注。加拿大多伦多大学Sargent课题组[16]、美国国家可再生能源实验室Nozik课题组[17]以及华东理工大学钟新华团队[18]在该方面较为突出。2016年，华东理工大学钟新华团队将量子点敏化太阳电池的光电转换效率提升至11.61%，并得到国家光伏质检中心认证[19]。

2.2 仿生纳米孔

仿生纳米孔道领域主要包括生物纳米孔和固态纳米孔等研究方向，涉及研究前沿5个、高被引论文45篇。如表4所示，美国在该领域具有非常显著的研究优势，高被引论文有23篇，超过总数的一半。英国和德国分列第2和第3位，中国只有1篇高被引论文。

表4　仿生纳米孔领域研究前沿高被引论文Top 10国家（2008—2015年）

排名	通讯作者国家	高被引论文（篇）	所占比例（%）
1	美国	23	51.1
2	英国	8	17.8
3	德国	4	8.9
4	荷兰	3	6.7
5	西班牙	2	4.4
6	中国	1	2.2
6	瑞士	1	2.2
6	韩国	1	2.2
6	日本	1	2.2
6	阿根廷	1	2.2

20世纪90年代，科学家提出了将单链DNA拉过蛋白孔，检测碱基穿过时电导的微小改变，进而实现纳米孔DNA测序的设想。进入21世纪后，越来越多的科研人员致力于该领域研究，让纳米孔测序成为现实，研究成果也逐步向商业实用方向迈进。本文分析得出，高被引论文涉及的纳米孔类型主要包括生物纳米孔和固态纳米孔等，测序主要包括核酸测序（主要是DNA测序）和蛋白质分析等。

生物纳米孔是指利用天然生物学通道（如α-溶血素结构、耻垢分枝杆菌孔蛋白A（MspA）等）的纳米孔。牛津纳米孔技术公司（Oxford Nanopore）Hagan Bayley团队开发了可商业化的α-溶血素生物纳米孔。2009年，该公司实现了碱基连续测定，准确度平均为99.8%[20]。此后，牛津纳米孔技术公司推出了商业化的纳米孔测序仪——MinION和GridION。基于纳米孔的单分子DNA读取技术不再需要光学检测和同步的试剂洗脱过程，也被称为第四代测序技术，相比更早的测序技术有着更快的数据读取速度和更大的应用潜能。2016年，MinION在国际空间站内成功完成微重力条件下的DNA测序，被《科学》评为当年十大科学突破。

2010年，美国华盛顿大学的Gundlach首次证明，MspA可用于DNA测序，并与阿拉巴马大学微生物学家Michael Niederweis合作证明MspA孔隙结合“棘轮系统”便可读取短DNA序列[21]。2012年，该团队利用MspA和噬菌体phi29聚合酶，实现单核苷酸的分辨率和DNA易位控制，推动了长期以来生物纳米孔遇到的两个主要障碍的解决[22]。同年，美国加州大学圣克鲁兹分校Mark Akeson团队也利用MspA和phi29聚合酶，使DNA正向和反向棘轮以每秒2.5—40个核苷酸的速度通过纳米孔实现单核苷酸分辨率的实时检测[23]。

生物纳米孔在稳定性、持久性等方面存在不足，难以满足持续的大规模测序需求。随着微加工技术的不断进步，固态纳米孔应运而生。人工制备的固态纳米孔具有孔径稳定、物化性能良好、低成本、高读长、易集成等优点，被认为是下一代纳米孔技术。固态纳米孔的材料主要有石墨烯、氮化硅、硅、金属氧化物等。

石墨烯在检测DNA上具有出色的潜力。2010年，哈佛大学Golovchenko团队和美国麻省理工学院的研究人员合作在《自然》上发表论文证实石墨烯可制成人工膜材料进行DNA测序，指引了石墨烯纳米孔DNA检测的方向。Golovchenko团队制备了与DNA分子直径紧密匹配的石墨烯纳米孔，发现其对DNA具有非常好的灵敏度和分辨率[24]。

同时，纳米孔的检测物范围也不断扩大，从DNA发展到RNA、蛋白质、金纳米颗粒和有毒分子等。例如，牛津纳米孔技术公司Hagan Bayley团队、美国加州大学圣克鲁兹分校Mark Akeson团队和荷兰代尔夫特技术大学Cees Dekker团队等利用生物纳米孔开展蛋白检测[25]；美国宾夕法尼亚大学Marija Drndi和Meni Wanunu团队利用薄的纳米孔快速检测小RNA分子[26]；英国东英吉利大学利用MinION测序鉴定细菌抗生素抗性岛的位置和结构[27]。

2.3 纳米催化

纳米催化领域主要包括催化剂的合成和制备、传统催化、电催化、光催化等子领域，涉及研究前沿92个、高被引论文303篇。催化剂的合成和制备主要包括活性组分、载体等研究方向，传统催化主要包括C1催化等研究方向，电催化主要包括燃料电池、电解水、二氧化碳转化等研究方向，光催化主要包括水和空气中污染物的降解、二氧化碳转化、光解水等研究方向。如表5所

表5 纳米催化领域研究前沿高被引论文Top 10国家（2008—2015年）

排名	通讯作者国家	高被引论文（篇）	所占比例（%）
1	中国	111	36.6
2	美国	72	23.8
3	日本	17	5.6
4	德国	14	4.6
5	韩国	13	4.3
6	澳大利亚	13	4.3
7	西班牙	10	3.3
8	马来西亚	9	3.0
8	新加坡	9	3.0
10	加拿大	7	2.3

示，我国在该领域的高被引论文数量排名第一，所占份额超过1/3，反映出我国近年来在纳米催化领域具有较强的研究优势。美国的高被引论文数量排名第二，所占比例接近1/4。其余国家高被引论文数量相对较少。

纳米催化剂通常由活性组分和载体两部分组成。常见的活性组分包括金属（及其化合物）、半导体、碳基材料（如石墨烯、碳纳米管、石墨相C_3N_4等）等。尺寸、形貌、结构、组成等是影响活性组分催化效用的重要因素。出于成本考虑，活性组分的总体研究趋势是在保证活性的前提下，尽量使用储量丰富、价格低廉的普通金属或非金属材料替代贵金属。常用的载体包括氧化物（如SiO_2、TiO_2、Fe_3O_4等）、碳基材料（如石墨烯、碳纳米管、石墨相C_3N_4等）、多孔材料（如沸石、介孔材料、金属有机框架化合物等）等。载体不仅为活性组分高度分散提供了表面，而且还可以参与催化过程，例如促进光生电荷分离等。对于多孔载体，孔道的限域可起到择形催化作用。由于易于分离回收，磁性可回收载体近年发展迅速。纳米催化的特点介于均相催化和非均相催化之间。中科院大连化物所张涛团队首次发现单原子催化剂具有与均相催化剂相当的活性，从实验上证明单原子可能成为沟通均相催化与多相催化的桥梁[28]。

纳米催化的反应类型大致分为传统催化、电催化和光催化3类。

在传统催化中，C1化学占据重要位置，包括费托合成、甲烷转化、CO氧化、CO_2还原、甲醇氧化等。近年来，我国C1化学取得一系列重大突破。中科院大连化物所包信和团队构建了硅化物晶格限域的单中心铁催化剂，成功地实现了甲烷在无氧条件下选择活化，一步高效生产乙烯、芳烃和氢气等高值化学品[29]。包信和团队还利用自主研发的新型复合催化剂，创造性地将煤气化产生的合成气高选择性地直接转化为低碳烯烃，乙烯、丙烯和丁烯的选择性大于80%，突破了费托合成低碳烯烃选择性最高58%的极限，改变了90多年来只能通过费托合成途径的历史[30]。中科院上海高等院和上海科技大学联合科研团队自主研发了暴露面为{101}和{020}晶面的Co_2C纳米平行六面体结构催化剂，实现了温和条件下（250 ℃、1—5个大气压）合成气高选择性直接制备烯烃，低碳烯烃选择性可达60%，总烯烃选择性高达80%以上，烯/烷比可高达30以上[31]。

在电催化中，燃料电池和金属-空气电池的阴极氧化还原反应是研究重点之一。铂是重要的氧化还原反应电催化剂。受铂成本高等缺点影响，催化剂一方面朝着减少铂用量方向发展，采用二元或三元合金的形式替代，例如Pt-Fe、Pt-Co、Pt-Fe-Cu等。另一方面朝着非铂催化剂方向发展，例如钯及其合金，以及氮掺杂的碳材料（如石墨烯、碳纳米管）等。电解水是另一类重要的电催化反应，新型析氢催化剂包括硫化钼化合物（如MoS_2、MoS_3等）、氮掺杂的碳纳米管封装的金属催化剂等，新型析氧催化剂包括氮掺杂的石墨烯等。美国斯坦福大学戴宏杰团队制备的Co_3O_4/氮掺杂石墨烯电催化剂同时具有很高的氧还原和析氧活性，受到强烈关注，文章被引次数超过2 000次[32]。CO_2的转化催化剂也是研究热点，中国科学技术大学谢毅团队采用新型钴基电催化剂，将CO_2高效清洁地转化为液体燃料，得到国际同行高度评价[33]。

在光催化中，水和空气中污染物的降解是研究重点之一，常用的催化剂包括TiO_2等半导体、BiOX（X = Cl, Br, I）、Ag/AgX（X = Cl, Br, I）、石墨相C_3N_4等。CO_2还原制CH_4、CH_3OH等碳氢燃料正处于研究热点，在减少温室气体的同时还可提供替代能源，常用催化剂包括TiO_2等半导体、Ag/AgX（X = Cl, Br, I）、金属有机框架化合物、石墨烯、石墨相C_3N_4等。光解水一直是光催化研究的重要课题，国家纳米科学中心宫建茹研究员和武汉理工大学余家国教授合作制备的石墨烯负载CdS光解水制氢催化剂受到高度关注，文章被引次数超过1 000次[34]。

2.4 测量表征

纳米测量表征领域主要包括超分辨光学显微成像、纳米尺度磁共振研究、电子显微测量等研究方向，涉及

研究前沿39个、高被引论文153篇。如表6所示，美国在该领域的高被引论文数量最多，德国和英国分列第2和第3位。中国为第4位，论文数量与美国有明显差距。

表6　测量表征领域研究前沿高被引论文 Top 10 国家（2008—2015年）

排名	通讯作者国家	高被引论文（篇）	所占比例（%）
1	美国	86	56.2
2	德国	18	11.8
3	英国	10	6.5
4	中国	8	5.2
4	西班牙	8	5.2
6	瑞士	6	3.9
7	意大利	4	2.6
8	荷兰	3	2.0
8	比利时	3	2.0
8	巴西	3	2.0

2.4.1 超分辨光学显微成像

近年来随着超分辨荧光显微术的兴起，研究人员研制了多种突破衍射极限的超分辨光学显微镜，分辨率可达20 nm左右，某些情况下甚至可小于2 nm。这些超分辨显微镜主要分为两类：一类以Stefan发明的受激辐射耗尽显微镜（STED）为代表，通过调制光照明方式来实现超分辨；另一类是基于单分子定位的超分辨显微镜，通过对具有光开关功能的荧光基团进行单分子成像和定位而实现，光活化定位显微技术（PALM）、随机光学重构显微技术（STORM）、荧光活化定位显微技术（fPALM）均是这一技术方向的研究热点。2014年诺贝尔化学奖授予发展超分辨率荧光显微成像技术的3位科学家，分别是美国霍华德·休斯医学研究所教授Eric Betzig（PALM技术）、德国马克斯普朗克生物物理化学研究所教授Stefan W. Hell（STED技术）和美国斯坦福大学教授William E. Moerner。

2.4.2 纳米尺度磁共振研究

当前通用的磁共振谱仪受制于探测方式，其成像分辨率仅为毫米级。纳米尺度弱磁探测技术将磁共振技术的研究对象推进到单分子，成像分辨率提升至纳米级。

2008年，德国斯图加特大学Wrachtrup团队和美国哈佛大学Lukin团队首次报道了利用金刚石中的氮-空位色心进行纳米尺度弱磁探测的工作，开创了纳米测磁研究方向[35]。此外，哈佛大学Yacoby团队和Walsworth团队以及中国科学技术大学杜江峰团队在该方向也非常活跃。杜江峰团队陆续取得了微波场的百纳米级分辨率矢量重构、绘制世界首张单个生物分子的磁共振谱等重大研究突破[36]。

2.4.3 电子显微测量研究

原位透射电子显微镜（*in situ* TEM）技术实现了对物质在外部激励下的微结构响应行为的动态、原位实时观测。美国能源部桑迪亚国家实验室黄建宇（已经全职加入燕山大学）团队利用原位透射电子显微镜技术对纳米电极材料的锂化和退锂化过程进行原位表征，首次实现了在透射电子显微镜下搭建锂离子电池体系，研究纳米线在锂化过程中的形貌变化和作为锂离子电池电极的锂化机理[37]。

3 总结

本文通过纳米领域文献计量分析，结合领域情报人员的研究，得出以下结论：

（1）基于科睿唯安公司ESI数据库中的11 814个研究前沿，通过文献检索、专家遴选等方法筛选出和纳米研究相关的研究前沿1 391个，涉及高被引论文6 639篇（2008—2015年）。在高被引论文数量方面，美国和中国分居前两位，遥遥领先于其他国家。

（2）把1 391个纳米研究前沿人工聚类形成若干研究方向和研究领域。选择了太阳能电池、纳米仿生孔、纳米催化、测量表征4个领域进行分析解读。在高被引论文数量方面，美国在太阳能电池、纳米仿生孔和测量表征3个领域排名第1，在纳米催化领域排名第2。我国在纳米催化领域排名第1，在太阳能电池领域排名第2，在测量表征领域排名第4，在纳米仿生孔领域未进入前

五。

（3）我国在纳米科技领域已形成一批达到世界领跑水平的优势研究方向和优秀团队。例如，太阳能电池方向——中科院化学所李永舫团队、中科院化学所侯建辉团队、北京大学占肖卫团队、南开大学陈永胜团队、华东理工大学钟新华团队等；C1 化学方向——中科院大连化物所包信和团队、中科院上海高等研究院和上海科技大学联合科研团队等。

参考文献

1 中国科学院科技战略咨询研究院. 2016研究前沿发布暨研讨会在中科院举行. [2016-11-1]. http://www.casaid.cn/ttxw1/zlyjytt/201706/t20170617_4813910.html

2 边文越, 李泽霞, 冷伏海. 构建包含知识元分析的科技前沿情报分析框架——以研究甲烷直接制乙烯为例. 图书情报工作, 2016, 60(10): 87-94.

3 Arora S K, Porter A L, Youtie J, et al. Capturing new developments in an emerging technology: an updated search strategy for identifying nanotechnology research outputs. Scientometrics, 2013, 95(1): 351-370.

4 王小梅, 邓启平, 李国鹏, 等. ESI研究前沿的科学图谱及在纳米领域的应用. 图书情报工作, 2017, 61(12): 106-112.

5 Kojima A, Teshima K, Shirai Y, et al. Organometal halide perovskites as visible-light sensitizers for photovoltaic cells. J Am Chem Soc, 2009, 131(17): 6050-6051.

6 Im J H, Lee C R, Lee J W, et al. 6.5% Efficient Perovskite Quantum-Dot-Sensitized Solar Cell. Nanoscale, 2011, 3(10), 4088-4093.

7 Lee M M, Teuscher J, Miyasaka T, et al. Efficient hybrid solar cells based on meso-superstructured organometal halide perovskites. Science, 2012, 338(6107): 643-647.

8 Burschka J, Pellet N, Moon S, et al. Sequential deposition as a route to high-performance perovskite-sensitized solar cells. Nature, 2013, 499 (7458): 316-319.

9 Yang W S, Noh J H, Jeon N J, et al. High-performance photovoltaic perovskite layers fabricated through intramolecular exchange. Science, 2015, 348(6240), 1234-1237.

10 Chen W, Wu Y Z, Yue Y F, et al. Efficient and stable large-area perovskite solar cells with inorganic charge extraction layers. Science, 2015, 350(6263): 944-948.

11 中国科学院科技战略咨询研究院, 中国科学院文献情报中心, 英国科睿唯安. 2016研究前沿及分析解读. 北京: 科学出版社, 2017, 44.

12 Lin Y, Zhao F, He Q, et al. High-performance electron acceptor with thienyl side chains for organic photovoltaics. J Am Chem Soc, 2016, 138 (14): 4955-4961.

13 中国科学院. 化学所在非富勒烯型聚合物太阳能电池研究中取得系列进展. [2016-7-1]. http://www.cas.cn/syky/201607/t20160701_4566879.shtml.

14 Gao L, Zhang Z, Xue L, et al. All-Polymer Solar Cells Based on Absorption-Complementary Polymer Donor and Acceptor with High Power Conversion Efficiency of 8.27%. Advanced Materials, 2016, 28 (9): 1884–1890.

15 南开大学新闻网. 南开团队有机太阳能电池研究获重大突破 光电转化效率达12.7%. [2016-12-14]. http://news.nankai.edu.cn/nkyw/system/2016/12/14/000310835.shtml.

16 Ip A H, Thon S M, Hoogland S, et al. Hybrid passivated colloidal quantum dot solids. Nature Nanotechnology, 2012, 7: 577-582.

17 Semonin O E, Luther J M, Choi S, et al. Peak external photocurrent quantum efficiency exceeding 100% via MEG in a quantum dot solar cell. Science, 2011, 334(6062): 1530-1533.

18 Pan Z, Zhao K, Wang J, et al. Near infrared absorption of $CdSe_xTe_{1-x}$ alloyed quantum dot sensitized solar cells with more than 6% efficiency and high stability. ACS Nano, 2013, 7(6): 5215–5222.

19 Du J, Du Z, Hu J, et al. Zn-Cu-In-Se quantum dot solar cells with a certified power conversion efficiency of 11.6%. J Am Chem Soc, 2016, 138(12): 4201-4209.

20 Clarke J, Wu H, Jayasinghe L, et al. Continuous base identification for single-molecule nanopore DNA sequencing. Nature Nanotechnology, 2009, 4: 265-270.

21 Derringtona I M, Butlera T Z, Collins M D, et al. Nanopore DNA sequencing with MspA. PNAS, 2009, 107(37): 16060-16065.

22 Manrao E A, Derrington I M, Laszlo A H, et al. Reading DNA at single-nucleotide resolution with a mutant MspA nanopore and phi29 DNA polymerase. Nature Biotechnology, 2012, 30: 349-353.

23 Cherf G M, Lieberman K R, Rashid H, et al. Automated forward and reverse ratcheting of DNA in a nanopore at 5-Å precision. Nature Biotechnology, 2012, 30: 344-348.

24 Garaj S, Hubbard W, Reina A, et al. Graphene as a subnanometre trans-electrode membrane. Nature, 2010, 467(7312): 190-193.

25 Plesa C, Kowalczyk S W, Zinsmeester R, et al. Fast translocation of proteins through solid state nanopores. Nano Lett, 2013, 13(2): 658-663.

26 Wanunu M, Dadosh T, Ray V, et al. Rapid electronic detection of probe-specific microRNAs using thin nanopore sensors. Nature Nanotechnology, 2010, 5(11): 807-814.

27 Ashton P M, Nair S, Dallman T, et al. MinION nanopore sequencing identifies the position and structure of a bacterial antibiotic resistance island. Nature Biotechnology, 2015, 33(3): 296-300.

28 中国科学院大连化学物理研究所. 我所单原子催化研究取得新进展. [2017-01-03]. http://www.dicp.ac.cn/xwzx/kjdt/201612/t20161228_4728792.html.

29 中国科学院. 2015科学发展报告. 北京: 科学出版社, 2015, 205.

30 新华社. 我国煤化工研究取得里程碑式突破 煤制烯烃将告别高耗水. [2016-03-04]. http://news.xinhuanet.com/2016-03/04/c_1118235820.htm.

31 中国科学院上海高等研究院. 中科院上海高研院合成气直接制烯烃研究获重大突破. [2016-10-06]. http://www.sari.cas.cn/xwzx/ttxw/201610/t20161003_4672665.html.

32 Liang Y, Li Y, Wang H, et al. Co_3O_4 nanocrystals on graphene as a synergistic catalyst for oxygen reduction reaction. Nature Materials, 2011, 10 (10): 780-786.

33 中国科大新闻网. 我校谢毅院士领衔团队成果登2016年度中国科学十大进展榜首. [2017-02-21] http://news.ustc.edu.cn/xwbl/201702/t20170221_267943.html.

34 Li Q, Guo B, Yu J, et al. Highly efficient visible-light-driven photocatalytic hydrogen production of CdS-cluster-decorated graphene nanosheets. J Am Chem Soc, 133(28): 10878-10884.

35 Balasubramanian G, Chan I Y, Kolesov R, et al. Nanoscale imaging magnetometry with diamond spins under ambient conditions. Nature, 2008, 455(7213): 648-651.

36 Shi F, Zhang Q, Wang P, et al. Single-protein spin resonance spectroscopy under ambient conditions. Science, 2015, 347(6226): 1135-1138.

37 Huang J Y, Zhong L, Wang C M, et al. *In situ* observation of the electrochemical lithiation of a single SnO_2 nanowire electrode. Science, 2010, 330(6010): 1515-1520.

Analysis of Nanoscience and Technology Development Based on ESI Research Fronts

Bian Wenyue Wang Haiming Xing Ying Li Guopeng Zhang Chaoxing Leng Fuhai

(Institutes of Science and Development, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract ESI database discovered research fronts in science through co-citation clustering method, each front consisted of a group of highly cited papers (Top 1%) that have been co-cited above a set threshold of similarity strength and their associated citing papers. This paper identified 1 391 research fronts related to nanoscience and technology from all 11 814 research fronts in ESI database by literature search and expert identification. Further, these research fronts were categorized into several research themes by expert identification. This paper focused on four research themes (solar cells, biomimetic nanopores, nanocatalysis and measurement and characterization), comparing the performance of producing highly cited papers among competitive countries and revealing the excellent research teams and well-performed research fronts of China.

Keywords research fronts, nanoscience and technology, solar cells, nanocatalysis, biomimetic nanopores

边文越 中科院科技战略咨询院助理研究员，理学博士。研究方向：科技政策，情报分析方法。

E-mail: bianwenyue@casipm.ac.cn

Bian Wenyue Assistant professor of Institutes of Science and Development, Chinese Academy of Sciences, received Ph.D. degree from Nankai University. The main research field includes science policy and information analysis. E-mail: bianwenyue@casipm.ac.cn

冷伏海 中科院科技战略咨询院研究员，管理学博士。研究方向：情报分析理论与方法。E-mail: lengfuhai@casipm.ac.cn

Leng Fuhai Male, Professor, Institutes of Science and Development, Chinese Academy of Sciences, Received Ph.D. degree from University of Chinese Academy of Sciences. The main research field includes information analysis. E-mail: lengfuhai@casipm.ac.cn